

Modelli numerici integrati in aree costiere:
un esempio di applicazione
nel nord Adriatico

*Integrated Numerical Models in Coastal Areas:
An Example of Their Application in the North
Adriatic Sea*

S. Carniel, M. Sclavo

CNR-ISMAR, Venezia

M. Tondello

Hydrosoil S.r.L., Padova

P. Ciavola

Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Ferrara

Introduzione

Nelle ultime decadi si è assistito ad un considerevole sviluppo nel campo dei modelli numerici impiegati per simulare processi dinamici delle aree costiere, fatto che consente ora a questi complessi strumenti di fornire supporti anche quantitativi ai *decision makers* in ambiti quali l'erosione e la vulnerabilità dei litorali.

Il miglioramento di alcune formulazioni teoriche ed il progressivo aumento di potenza di calcolo (insieme ad una crescente disponibilità di osservazioni a lungo termine e di *output* numerici provenienti da modelli meteorologici e dello stato del mare) consentono oggi applicazioni ad alta risoluzione ed implementazioni nel lungo periodo.

In ogni caso, l'utilizzo efficace di tali strumenti numerici è funzione della loro capacità di descrivere correttamente una varietà di processi fisici tra loro "integrati". Partendo dall'interfaccia atmosfera-oceano, passando al mescolamento turbolento delle masse d'acqua ed arrivando alle interazioni acqua-sedimento, la modellistica numerica integrata si confronta con una serie di problematiche scientifiche ed applicative ancora aperte. Esempi sono rappresentati dalle interazioni non lineari onde-correnti, dal problema della turbolenza, dalla modellizzazione dei processi di risospensione e trasporto di sedimenti, dal ruolo delle onde di lungo periodo nel generare erosione di spiagge e dune. La loro trattazione nell'ambito dei modelli numerici è necessaria per una serie di applicazioni che spaziano dalla protezione dei litorali ad attività *search and rescue* o di supporto ad opere ingegneristiche marine e a strutture operazionali.

Introduction

Recent decades have witnessed considerable developments in the field of integrated numerical models used for simulating dynamic processes in coastal areas, that can now provide quantitative support to decision makers for questions such as erosion and coastal vulnerability.

Improvements in various theoretical formulations and an on-going increase in computing power (alongside the growing availability of long-term observations and numerical output from meteorological and sea-state models) allow the implementation of high-resolution and long-term applications.

However, the efficient use of these numerical tools is a function of their capacity to describe a variety of physical processes that are 'integrated' amongst themselves correctly. Indeed, from the air-sea interface to the turbulent mixing of water masses and the water-sediment interaction, integrated numerical modelling has to face a series of scientific and practical challenges still open. Examples include the non-linear interaction of waves and currents, the problem of turbulence, the modelling of resuspension and sediment-transport processes, the role of long-period waves in generating beach and dune erosion. Dealing with these using numerical models is necessary for a variety of reasons, from protecting the coast to search-and-rescue activities and support for marine construction work of all types.

The mouth of the river Bevano: a case study

This article will give a brief description of the implementation and using the ROMS integrated 3-D model (www.myroms.org) in a region of the NW Adriatic sea south of the town of Ravenna. The study area is located along the coast

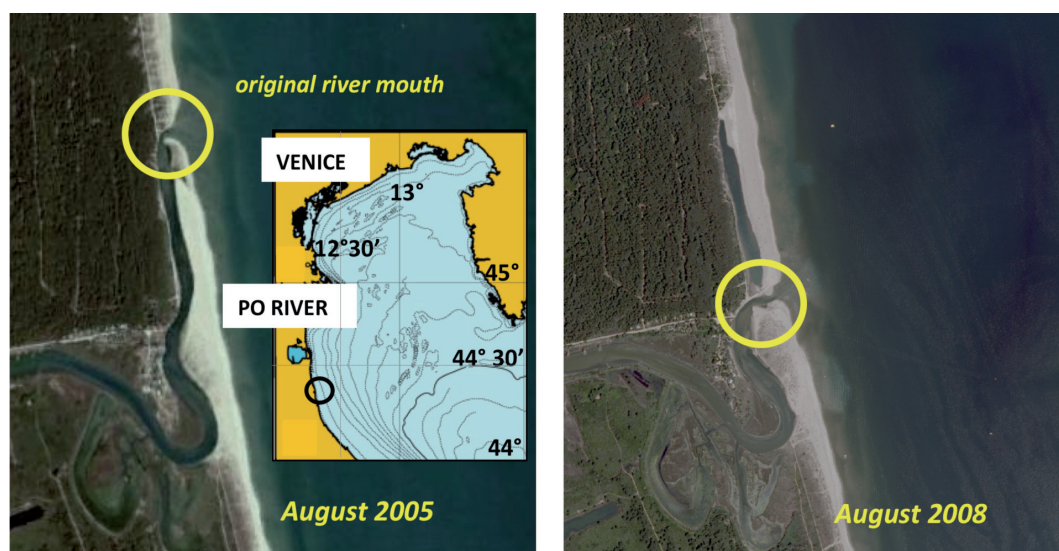


Figura 1. Immagine da satellite (Google Earth™) della zona del fiume Bevano prima (pannello di sinistra, 2005) e dopo (pannello di destra) l'apertura della nuova foce. I due cerchi gialli evidenziano la posizione delle due bocche.

Figure 1. Satellite image (Google Earth™) of the Bevano river region before (2005, left) and after (right panel) the new river opening. The two mouths are shown inside the yellow circles.

La foce del fiume Bevano: un caso di studio

L'articolo descrive succintamente alcuni risultati dell'implementazione prototipale del modello integrato 3-D ROMS (www.myroms.org) in un'area nord-occidentale del Mare Adriatico, a sud della città di Ravenna. L'area investigata si trova lungo la costa della regione Emilia-Romagna, più specificamente in prossimità della foce del fiume Bevano (si veda il riquadro in Figura 1).

La zona della foce del fiume Bevano è stata lasciata libera di evolversi naturalmente fino a circa il 2005 (Figura 1, pannello di sinistra), ed era caratterizzata da una progressiva migrazione della foce stessa verso nord (Ciavola et al., 2004). La foce esistente fu chiusa ad inizio 2006 (si veda di nuovo la Figura 1, pannello di destra) ed una nuova uscita dragata ca. 500-600 m più a sud. Ancora più a sud di que-

of the Emilia-Romagna region, more specifically in the proximity of the small Bevano river inlet (see inset in Figure 1).

The Bevano river mouth was left free to evolve naturally until about 2005 (Figure 1, left panel), and was characterized by a progressive migration to the north (Ciavola et al., 2004). The existing northern river mouth was closed at the beginning of 2006 (see again Figure 1, right panel), and a new inlet was dredged about 500-600 m to its south. South of this new mouth, a floodway has been created to increase the direct discharge to the sea in case of river flood. Finally, to limit the typical northward migration of the river mouth, the new river mouth was protected by a timber structure. Full description of the morphological evolution of the area before and after the intervention can be found in Ciavola (2009).

sta nuova foce, in corrispondenza dell'ultimo meandro, è stato realizzato uno scolmatore di piena, di modo da consentire al fiume di avere uno scarico diretto verso mare in caso di piene significative. Infine, per limitare la naturale migrazione verso nord della foce, la nuova bocca è stata protetta da una palizzata lignea. Una descrizione completa dell'evoluzione morfologica dell'area prima e dopo l'intervento è trattata in Ciavola (2009).

Il modello 3-D ROMS utilizzato è accoppiato con il modello di moto ondoso SWAN ed una suite di moduli dedicati al trasporto e risospensione di sedimenti; è in grado di riprodurre la circolazione idrodinamica dell'area, la propagazione locale del moto ondoso e la risultante mobilitazione e trasporto dei sedimenti. Il modello consente di simulare anche l'allagamento delle celle computazionali e di modellizzare fenomeni evolutivi del fondo.

Le simulazioni sono state condotte sia in condizioni di forzanti ordinarie (normali cicli "medi" di marea) che in condizioni di eventi estremi di portata e moto ondoso (solo queste ultime verranno brevemente discusse in questo contributo). Il modello ha permesso di descrivere la risposta del sistema alle forzanti esterne in termini di variazioni batimetriche e di trasporto dei sedimenti. Per una descrizione dettagliata delle capacità degli strumenti numerici adottati si rimanda a Warner et al. (2008) e Carniel et al. (2009). Lo studio ha utilizzato dati batimetrici, granulometrici, mareografici e valori della portata del torrente Bevano reperiti in letteratura (Ciavola et al., 2005; Gardelli et al., 2007) e altri dati raccolti dall'Università di Ferrara all'interno delle attività del Progetto MICORE (www.micore.eu). Il dominio di calcolo è rappresentato da una griglia curvilinea ortogonale con celle di dimensioni variabili, e copre un'area totale di 1500 m per 4000 m, risolto da 160 nodi lungo l'asse X (avente risoluzione variabile da 8.5 m

The 3-D ROMS model used is coupled with the SWAN wave model [www.swan.tudelft.nl] and a suite of routines describing sediment resuspension and transportation; it is able to reproduce the hydrodynamic circulation of the area, the local wave state and the related sediment transport. By simulating the flooding of part of the numerical domain and the seabed evolution, the model allows only to reproduce the submerged beach evolution.

Numerical simulations have been carried out during normal forcing conditions (i.e. average tide cycles) and extreme river flow and wave conditions (only the latter cases will be discussed here). The model allowed the description of how the system should respond to external forcing in terms of bathymetric variation and sediment transport. For a detailed description of the capacities of the numerical tools used, see Warner et al. (2008) and Carniel et al. (2009).

This study used data from bathymetry, granulometry, tide gauges and values for the flow of the Bevano from the scientific literature (Ciavola et al., 2005, Gardelli et al., 2007) as well as data collected by the University of Ferrara in the framework of the MICORE project (www.micore.eu). The area investigated is represented by a curvilinear orthogonal grid with cells of varying dimensions, covering in total 1500 m by 4000 m, with 160 nodes along the X axis (a resolution from 8.5 m to 23.5 m) and 115 along the Y axis (a resolution from 6.9 m to 56.9 m).

The goal of this research activity was to set up a numerical tool that, once calibrated using field data, could supply information on the evolution of the mouth of the Bevano and the sea area directly in front of it, including an estimate of morphological evolution and evolutionary tendencies responding to important extreme events (storms, river flooding, storm surges).

a 23.5 m) e da 115 nodi lungo l'asse Y (con risoluzione da 6.9 a 56.9 m).

L'obiettivo dell'attività di ricerca è stato quello di allestire uno strumento numerico che, una volta validato con dati acquisiti sul campo, potrebbe fornire indicazioni sull'evoluzione della foce del torrente Bevano e dello specchio di mare antistante, inclusa una stima dell'evoluzione morfologica e delle tendenze evolutive in risposta ad eventi esterni significativi (mareggiate provenienti dai settori di traversia principali del paraggio, piene).

Risultati

Simulazione in condizione di piena

La simulazione in condizioni di piena del torrente Bevano è stata condotta fornendo in *input* al modello, oltre alla forzante mareale, anche l'idrogramma di piena corrispondente ad un tempo di ritorno di 30 anni, schematizzato con andamento triangolare (picco corrispondente a $130 \text{ m}^3/\text{s}$) e durata complessiva di 24 ore. Il picco della piena è stato fatto coincidere con un picco di alta marea. La Figura 2a mostra il campo della circolazione media integrata e del trasporto di sedimenti in corrispondenza del picco della piena.

Appare evidente come il flusso in uscita, di notevole intensità, interessi oltre che la foce principale anche lo scolmatore di piena realizzato all'altezza del meandro. Il trasporto solido mostra una maggiore concentrazione di sedimenti in uscita in corrispondenza della foce principale (a nord) e una quantità più modesta a sud, in corrispondenza dello scolmatore.

La Figura 2b mostra le variazioni del fondale rispetto all'istante iniziale (i.e. all'inizio della piena), rappresentate in termini di erosione/deposizione; i valori sono stati conven-

Results

River flood simulation

Simulation of a typical Bevano river flood was carried out forcing the model with both tide forcings and a flood corresponding to a return time of 30 years, schematized by a triangular shape (the peak corresponding to $130 \text{ m}^3/\text{s}$) and lasting for 24 hours. Figure 2a shows the integrated average circulation field, as well as sediment transport, at the flood peak. It can be clearly seen how the outflow, which is of noteworthy intensity, is not only directed along the main mouth but also above the floodway created at the first meander. Sediment transport shows a greater concentration of outgoing sediment at the main mouth (north) and a smaller quantity to the south at the floodway. Figure 2b shows sea bottom variations compared to the beginning of the simulation (i.e., at the beginning of the flood) represented in terms of erosion/deposition. Values have been conventionally adimensionalized with respect to the maximum erosion values. We can see that the sea bottom gets deeper in the area close by the river mouth, and that there is a slight tendency to deposition in the area in front of the river mouth.

Simulation with a Bora storm

A first type of simulation was carried out inputting into the model sea and weather conditions recorded by the Cesenatico buoy owned by the ARPA-SIMC during a typical wave event caused by the Bora (a wind coming from NE).

Figure 3a shows the significant wave height and relative directions. As the waves move towards the coast, the effects of refraction and wave-breaking cause a progressive variation of significant height and a rotation of their direction of propagation. There is also a certain

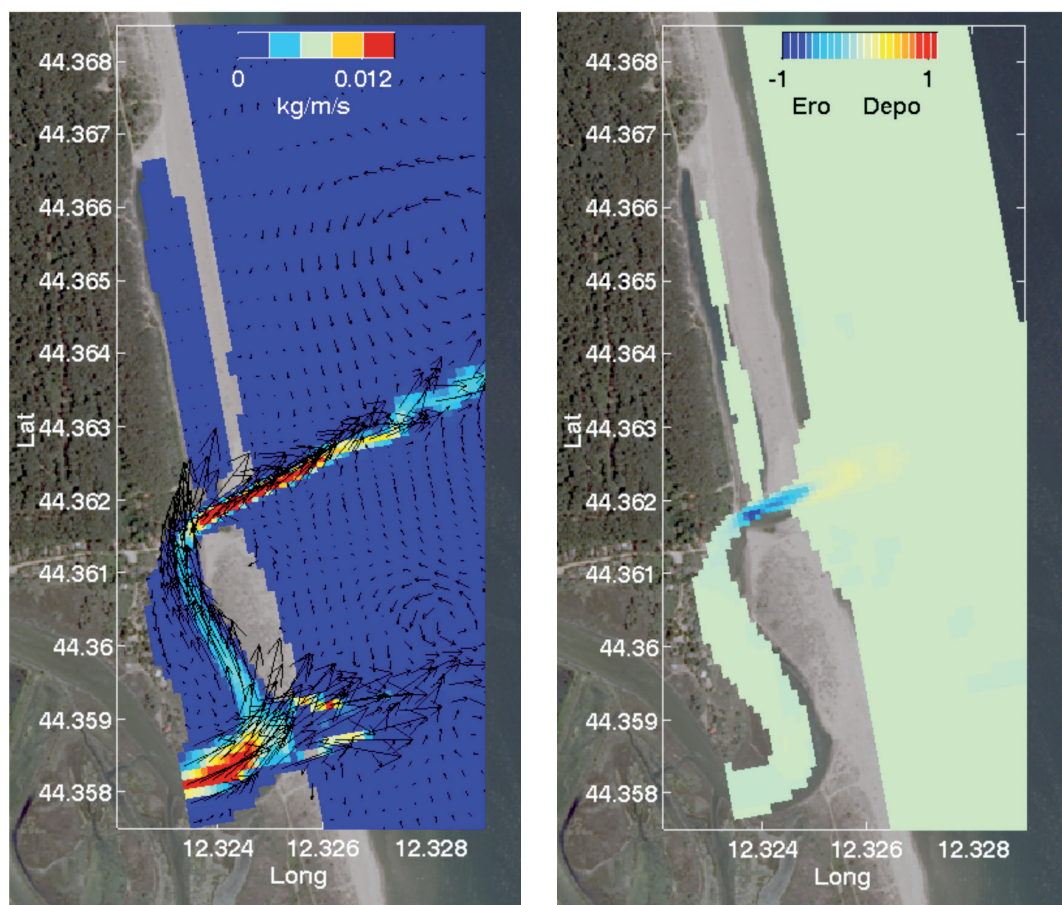


Figura 2. Simulazione di un evento di piena del fiume Bevano. Pannello di sinistra: trasporto solido (kg/m/s) e velocità verticalmente integrata (vettore massimo ca. 1.5 m/s) al picco della piena. Pannello di destra: variazione del livello del fondo alla fine della piena (unità adimensionali).

Figure 2. Simulation of the Bevano river flooding. Left: transport of solids (kg/m/s) and vertically integrated velocity (max. vector approx. 1.5 m/s) at the peak of the flood. Right: seabed variation at the end of the river flood (adimensionalized erosion and deposition values).

zionalmente adimensionalizzati rispetto al massimo valore di erosione. Si riscontra un approfondimento dei fondali in corrispondenza del tratto terminale di foce e una modesta tendenza alla deposizione nello specchio acqueo antistante.

Simulazione con mareggiata di Bora

Una prima tipologia di simulazione è stata condotta fornendo in input al modello le

wave propagation inside the inlet, favoured by wave set-up.

Figure 3b shows the integrated average circulation field and sediment transport at the peak of the storm, which generates a current directed from north to south. In particular, the highest velocities may be depicted at a certain distance from the shore, at the outer edge of the sandbar. In the proximity of the river mouth, the current tends to move away from the coast and follow the bathymetric convexities. Surface

caratteristiche meteomarine registrate dalla boa di Cesenatico di proprietà di ARPA-SIMC durante un tipico evento ondoso proveniente dalla traversia di Bora (proveniente da direzione NE).

In Figura 3a si riporta il piano d'onda della mareggiata: ai valori di altezza significativa sono sovrapposte le direzioni locali dell'onda, indicate mediante vettori. Procedendo

velocities peaks are about 0.8 m/s. As with currents, the sediment transport also heads south and concerns quite a large strip of coast, with greater intensity beyond the sandbar area.

Furthermore, we may observe a general tendency towards deposition in front of the river mouth; this is associated with the combined effect of the reduced tidal flow and the wave action.

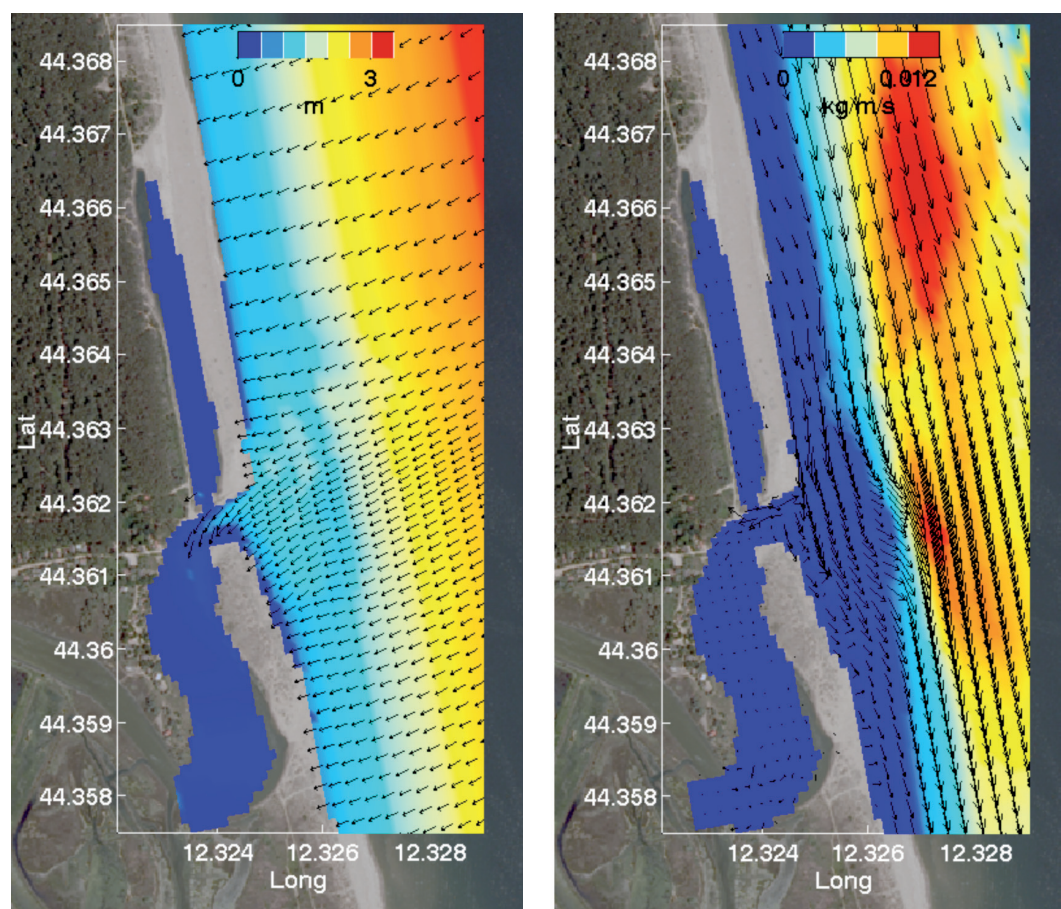


Figura 3. Simulazione di una tempesta di Bora. Pannello di sinistra: campo di altezza d'onda significativa (m) e relative direzioni di propagazione. Pannello di destra: associato trasporto totale di sedimenti (kg/m/s) con velocità verticalmente integrata (vettore massimo ca. 0.8 m/s).

Figure 3. Simulation during a typical Bora storm. Left: significant wave height fields (m) with relative directions. Right: total sediment transport (kg/m/s) and vertically integrated velocity vectors (max. vector approx. 0.8 m/s).

verso costa, l'effetto della rifrazione e del frangimento determina una progressiva riduzione dell'altezza significativa e una rotazione della direzione di propagazione, che tende a coincidere con la normale al litorale. Appare evidente anche una propagazione dell'onda all'interno della boca, favorita dal wave set-up.

La Figura 3b illustra il campo della circolazione media integrata e del trasporto di sedimenti in corrispondenza del picco della mareggiata, che genera una corrente diretta da nord verso sud; in particolare, le velocità più elevate si presentano ad una certa distanza da riva, sul lato esterno della barra. In corrispondenza della foce la corrente tende ad allontanarsi da costa, seguendo la convessità della batimetria. Le velocità superficiali presentano picchi massimi di ca. 0.8 m/s. Analogamente alle correnti, anche il trasporto solido è diretto verso sud ed interessa una fascia di litorale piuttosto ampia, con intensità maggiore oltre la zona delle barre. Si osserva inoltre una generale tendenza alla deposizione di fronte alla foce, cui prevedibilmente si associa una tendenza all'occlusione della foce per effetto combinato della crescita del getto sopraflutto e del ridotto flusso di marea.

Conclusioni

Il caso di studio dimostra come sia possibile impiegare strumenti numerici integrati ad altissima risoluzione per simulare in maniera dettagliata l'evoluzione di sistemi costieri complessi caratterizzati da una cospicua variabilità batimetrica e sedimentologica.

Ulteriori rilievi periodici della linea di riva e misure condotte *in situ* permetteranno di validare il prototipo implementato e di fornire nel contempo indicazioni sugli intervalli di confidenza associabili alle variazioni modellizzate.



Conclusions

This case study demonstrates how it is possible to use integrated numerical tools with a very high resolution to provide detailed simulations of the evolution of complex coastal systems characterized by significant bathymetric and sedimentological variability.

Additional periodical coast line and hydrological *in-situ* measurements will allow the prototype presented here to be properly calibrated and used for planning maintenance engineering works of the inlet.

Ringraziamenti

Si ringrazia ARPA-SIMC Emilia Romagna per aver messo a disposizione i dati della della boa di Cesenatico.

Acknowledgements

We acknowledge ARPA-SIMC Emilia Romagna for having made available the data of the Cesenatico buoy.

Riferimenti bibliografici

- Carniel, S., Warner, J.C., Chiggiato, J. and Sclavo, M., 2009. Investigating the impact of surface wave breaking on modelling the trajectories of drifters in the Northern Adriatic Sea during a wind-storm event. *Ocean Modeling*, **30**, pp. 225-239. DOI:10.1016/j.ocemod.2009.07.001
- Ciavola, P., 2009. La morfodinamica della foce prima dell'intervento. In: Foce Bevano: l'area protetta e l'intervento di salvaguardia, Regione Emilia-Romagna, cap. 2.2, pp. 17-18.
- Ciavola, P., Billi, P., Armaroli, C., Preciso, E., Salemi, E., and Balouin, Y., 2005. Morphodynamics of the Bevano Stream outlet: the role of bedload yield. *Geologia tecnica ed Ambientale*, **2005/1**, pp. 41-57.
- Gardelli, M., Caleffi, S. and Ciavola, P., 2007. Evoluzione morfodinamica della foce del Torrente Bevano. *Studi Costieri*, **13**, pp. 53-74.
- Warner, J.C., Sherwood, C.R., Signell, R.P., Harris, C.K. and Arango, H.G., 2008. Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model. *Computers & Geosciences*, **34(10)**, pp. 1284-1306